

学校编码: 10384

分类号__密级

学号: 20620090153291

UDC

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

固定化培养微藻去除水体中氮磷及藻液蒸发浓缩的研究
Study on immobilized cultivation of microalgae for water
body N/P removal and dewatering of microalgae
suspension by evaporation

曾宪海

指导教师姓名: 卢英华 教授

专 业 名 称: 工 业 催 化

论文提交日期: 2012 年 5 月

论文答辩时间: 2012 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席:

评阅人:

2012 年 6 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

致谢

学生生涯转瞬即逝，回首往事，虽已远去，铭刻于心。深知对世界及对自我的了解甚少，吾辈不遗余力，上下求索。然若无师长传道授业、谆谆垂教，同学同门，取长补短，师弟师妹，相互砥砺，吾人生之书定当无法落笔。南强六载，师长之教导、同窗之切磋、父母之培育，仅借此简文，以表感激。

恩师卢英华教授，宅心仁厚，博学睿智，和蔼可亲。无论是学业之解惑，还是人生之导向，从选题定向到实验方案和成果写作，耐心细致，微言大义，深入浅出，常令我醍醐灌顶，柳暗花明。陈晓东教授，亦是严谨执着，循循善诱，视野宽阔，使我受益终生。承蒙卢陈两位教授推荐及国家留学基金委资助，有幸越洋取经。在澳期间，Monash 大学合作导师 Michael 博士，细致敏捷，宽宏大量，精益求精，让我两载收获颇丰。

厦大化院，科研重镇，浓郁之学术氛围熏陶六载，我将受用一生。化工师长，各擅所长，鱼渔双授。何宁教授时常促膝谈心，彪哥则不时耳提面命，示我通途；宗源、意珣、柏山、秉辉、李军、庆林等诸位教授，不弃浅陋，常倾囊相授。敬姚凌沈彭双陈等各位老师，常开便利之门，使我如鱼得水。Monash 化工之教研管工，不遗余力协我科研生活；同门朋友，助我之急，一并志谢。

吾厦大之同学同门，朝夕相处，互爱互助，共同成长。不论已高飞之兄姐，亦或继续学习之弟妹，都为我科研生活增色甚多。衷心祝福各位手足健康快乐，一路高歌。

求学异域，与亲人聚少离多，感谢家人支持宽容，让我专心求学，养育之恩，无以为报。然天赐良缘，爱人及其长辈对吾关爱有加，体贴入微，更是明吾志向。每念于此，欲潸然泪下，曾某何德何能？唯有奋发向上书吾之壮书也！

自强！自强！学海何洋洋！谁欤操钥发其藏？南方之强！自强！自强！人生何茫茫！谁欤普渡驾慈航？南方之强！

曾宪海

壬辰年闰四月 于南强之嘉锡楼

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

摘要	XI
Abstract.....	XIII
第一章 文献综述	- 1 -
1.1 能源、环境与微藻.....	- 1 -
1.2 微藻及其应用.....	- 3 -
1.2.1 微藻简介	- 3 -
1.2.2 微藻的应用	- 5 -
1.2.3 微藻的悬浮培养方式.....	- 5 -
1.3 生物固定化技术.....	- 8 -
1.3.1 生物微胶囊极其性能.....	- 9 -
1.3.2 生物微胶囊的制备方法.....	- 10 -
1.3.3 生物微胶囊的应用.....	- 11 -
1.4 微藻的固定化技术.....	- 12 -
1.5 微藻的固定化技术的应用.....	- 12 -
1.5.1 固定化培养微藻获得藻体及代谢产物.....	- 13 -
1.5.2 废水处理.....	- 13 -
1.5.3 环境毒性检测.....	- 14 -
1.5.4 共固定化培养微藻和细菌.....	- 14 -
1.6 NaCS-PDMAAC 生物微胶囊.....	- 14 -
1.6.1 NaCS 的制备	- 15 -
1.6.2 NaCS-PDMAAC 微胶囊的制备	- 15 -
1.6.3 NaCS-PDMAAC 微胶囊的优势及应用	- 16 -
1.7 微藻液脱水工业.....	- 17 -
1.8 降膜蒸发技术.....	- 19 -
1.9 本研究的目的、意义与内容.....	- 20 -
1.9.1 研究目的与意义.....	- 20 -
1.9.2 研究内容.....	- 20 -

本章主要参考文献.....	- 21 -
第二章 NaCS-PDMDAAC 微藻胶囊的制备与表征	- 35 -
2.1 引言	- 35 -
2.2 材料与方法	- 35 -
2.2.1 实验试剂及仪器.....	- 35 -
2.2.2 藻种.....	- 35 -
2.2.3 培养基.....	- 35 -
2.2.4 NaCS 的制备	- 37 -
2.2.5 NaCS-PDMDAAC 生物微胶囊的制备	- 39 -
2.2.6 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.微藻生物微胶囊的制备	- 40 -
2.2.7 NaCS-PDMDAAC 胶囊固定化 <i>Chlorella</i> sp.微藻的培养	- 41 -
2.2.8 NaCS 及 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.微藻生物微胶囊的表征	- 41 -
2.3 结果与讨论.....	- 42 -
2.3.1 NaCS-PDMDAAC 微胶囊的形态学表征	- 42 -
2.3.2 NaCS 及 NaCS-PDMDAAC 微胶囊的 FT-IR 分析.....	- 46 -
2.3.3 NaCS 及 NaCS-PDMDAAC 微胶囊的 SEM-EDX 分析.....	- 48 -
2.3.4 NaCS 及 NaCS-PDMDAAC 微胶囊的 NMR 分析.....	- 50 -
2.4 本章小结	- 51 -
本章主要参考文献.....	- 52 -
第三章 固定化培养 <i>Chlorella</i> sp. 去除水体中氮磷的研究.....	- 57 -
3.1 引言	- 57 -
3.2 材料与方法	- 57 -
3.2.1 实验试剂及仪器.....	- 57 -
3.2.2 藻种.....	- 58 -
3.2.3 培养基.....	- 58 -
3.2.4 NaCS 的制备	- 58 -
3.2.5 NaCS-PDMDAAC 生物微胶囊的制备	- 58 -
3.2.6 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.胶囊的制备及表征.....	- 58 -
3.2.7 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp.微藻的分批培养	- 58 -
3.2.8 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp.微藻回收培养去除水体中氮磷.....	- 59 -

3.2.9 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp.微藻对不同水体的适应性研究	59 -
3.2.10 分析方法.....	59 -
3.3 结果与讨论.....	60 -
3.3.1 <i>Chlorella</i> sp.细胞与 NaCS-PDMDAAC 微胶囊的生物相容性	60 -
3.3.2 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.胶囊密度对细胞摄取氮和磷的影响.....	65 -
3.3.3 初始氮磷浓度对 <i>Chlorella</i> sp.细胞摄取氮和磷的影响.....	67 -
3.3.4 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.胶囊对不同水体的适应性研究.....	69 -
3.3.5 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.胶囊的泄漏性评估.....	70 -
3.4 本章小结.....	72 -
本章主要参考文献.....	73 -
第四章 悬浮及固定化培养 <i>Chlorella</i> sp. 细胞生化差异的分析.....	79 -
4.1 引言.....	79 -
4.2 材料与方法.....	79 -
4.2.1 藻种.....	79 -
4.2.2 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.微藻生物微胶囊的制备与表征.....	79 -
4.2.3 NaCS-PDMDAAC 胶囊固定化 <i>Chlorella</i> sp.微藻的分批培养	79 -
4.2.4 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp.微藻胶囊藻液的预处理.....	79 -
4.2.5 油脂提取及其酯化.....	80 -
4.2.6 色素提取.....	82 -
4.2.7 Experion™ 自动化芯片凝胶电泳及二维聚丙烯酰胺凝胶电泳	83 -
4.2.8 分析方法.....	89 -
4.3 结果与讨论.....	89 -
4.3.1 不同细胞破碎方法对 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp.细胞的影响	89 -
4.3.2 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp. 细胞的生理学表征	93 -
4.3.3 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp. 细胞的油脂分析	94 -
4.3.4 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp. 细胞的色素分析	95 -
4.3.5 NaCS-PDMDAAC 固定化 <i>Chlorella</i> sp. 细胞的蛋白表达分析	96 -
4.4 本章小结.....	98 -
本章主要参考文献.....	99 -
第五章 微藻液液池沸腾蒸发浓缩特性的研究	103 -

字符说明.....	- 103 -
5.1 引言.....	- 104 -
5.2 材料与方法.....	- 104 -
5.2.1 藻种.....	- 104 -
5.2.2 培养基.....	- 105 -
5.2.3 微藻的培养.....	- 106 -
5.2.4 微藻液的预处理.....	- 107 -
5.2.5 实验设备.....	- 107 -
5.2.6 分析方法.....	- 109 -
5.2.7 实验误差分析.....	- 110 -
5.3 结果与讨论.....	- 111 -
5.3.1 微藻液的导热系数、密度及比热容.....	- 111 -
5.3.2 流变力学分析.....	- 114 -
5.3.3 微藻液的沸腾及沸点.....	- 114 -
5.3.4 微藻液液池沸腾的传热传质现象分析.....	- 117 -
5.3.5 微藻液液池沸腾 $Nu-Re_b$ 的 Cornwell 方程.....	- 122 -
5.3.6 真空沸腾对微藻细胞的影响.....	- 125 -
5.4 本章小结.....	- 129 -
本章主要参考文献.....	- 130 -
第六章 微藻液降膜蒸发浓缩特性的研究.....	- 135 -
字符说明.....	- 135 -
6.1 引言.....	- 135 -
6.2 材料与方法.....	- 136 -
6.2.1 藻液培养及预处理.....	- 136 -
6.2.2 实验装置.....	- 136 -
6.2.3 系统试车.....	- 144 -
6.2.4 系统操作步骤.....	- 145 -
6.2.5 实验误差分析.....	- 146 -
6.2.6 传热系数的计算.....	- 146 -
6.2.7 藻液表面张力测定.....	- 147 -

6.3 沸腾传热理论.....	- 148 -
6.3.1 微藻液降膜蒸发的两个形态.....	- 148 -
6.3.2 微藻液的表面张力及气泡形成.....	- 149 -
6.3.3 核泡沸腾.....	- 150 -
6.4 结果与讨论.....	- 151 -
6.4.1 传热现象.....	- 151 -
6.4.2 气泡形成.....	- 156 -
6.4.3 气泡形成机理分析.....	- 158 -
6.5 本章小结.....	- 160 -
本章主要参考文献.....	- 161 -
第七章 结论与展望	- 167 -
7.1 结论.....	- 167 -
7.2 本文的创新之处.....	- 168 -
7.3 展望与建议.....	- 168 -
在读期间的科研成果	- 171 -
附录	- 173 -

Contents

Chinese abstract.....	XI
Abstract.....	XIII
Chapter 1 Introduction	- 1 -
1.1 Energy sources, environment and microalgae.....	- 1 -
1.2 Microalgae and its applications	- 3 -
1.2.1 Microalgae	- 3 -
1.2.2 Applications of microalgae	- 5 -
1.2.3 Suspended cultivation strategies of microalgae	- 5 -
1.3 Biological immobilization technology.....	- 8 -
1.3.1 Microcapsules	- 9 -
1.3.2 Preparation of microcapsules.....	- 10 -
1.3.3 Applications of microcapsules.....	- 11 -
1.4 Immobilization of microalgae	- 12 -
1.5 Applications of immobilized microalgae	- 12 -
1.5.1 Gaining biomass and metabolins	- 13 -
1.5.2 Wastewater treatment.....	- 13 -
1.5.3 Environmental monitoring	- 14 -
1.5.4 Immobilized cocultivation of microalgae with bacteria.....	- 14 -
1.6 NaCS-PDMDAAC microcapsules	- 14 -
1.6.1 Preparation of NaCS	- 15 -
1.6.2 Preparation of NaCS-PDMDAAC microcapsules	- 15 -
1.6.3 Characteristics and applications NaCS-PDMDAAC microcapsules	- 16 -
1.7 Dewatering industry of microalgae culture	- 17 -
1.8 Falling film evaporation technology	- 19 -
1.9 Purpose and significance of this research	- 20 -
1.9.1 Purpose.....	- 20 -
1.9.2 Contents	- 20 -

References	- 21 -
Chapter 2 Preparation and characterization of NaCS-PDMDAAC microalgae microcapsules	- 35 -
2.1 Introduction	- 35 -
2.2 Materials and methods	- 35 -
2.2.1 Reagents and apparatus	- 35 -
2.2.2 Microalgal strain	- 35 -
2.2.3 Medium	- 35 -
2.2.4 Preparation of NaCS	- 37 -
2.2.5 Preparation of NaCS-PDMDAAC microcapsules	- 39 -
2.2.6 Preparation of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules	- 40 -
2.2.7 NaCS-PDMDAAC immobilized cultivation of <i>Chlorella</i> sp	- 41 -
2.2.8 Characterization of NaCS and NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules	- 41 -
2.3 Results and discussion.....	- 42 -
2.3.1 Morphology of NaCS-PDMDAAC capsules	- 42 -
2.3.2 FT-IR analysis of NaCS and NaCS-PDMDAAC capsules.....	- 46 -
2.3.3 SEM-EDX analysis of NaCS and NaCS-PDMDAAC capsules	- 48 -
2.3.4 NMR analysis of NaCS and NaCS-PDMDAAC capsules.....	- 50 -
2.4 Conclusions	- 51 -
References	- 52 -
Chapter 3 NaCS-PDMDAAC immobilized cultivation of <i>Chlorella</i> sp. for water body N/P removal	- 57 -
3.1 Introduction	- 57 -
3.2 Materials and methods	- 57 -
3.2.1 Reagents and apparatus	- 57 -
3.2.2 Microalgal strain	- 58 -
3.2.3 Medium	- 58 -
3.2.4 Preparation of NaCS	- 58 -
3.2.5 Preparation of NaCS-PDMDAAC microcapsules	- 58 -
3.2.6 Preparation and characterization of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules	- 58 -

3.2.7 Batch cultivation of NaCS-PDMDAAC immobilized <i>Chlorella</i> sp.	58 -
3.2.8 Semi-continous cultivation of NaCS-PDMDAAC immobilized <i>Chlorella</i> sp. with capsule recycling for N/P removal.....	59 -
3.2.9 Study of immobilized <i>Chlorella</i> sp. adaptation to different water body.....	59 -
3.2.10 Analytical methods	59 -
3.3 Results and discussion.....	60 -
3.3.1 Biocompatibility of <i>Chlorella</i> sp. cells with NaCS-PDMDAAC capsules.....	60 -
3.3.2 Effect of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsule density	65 -
3.3.3 Effect of initial concentration of N/P	67 -
3.3.4 Adaptation study of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules on different water body treatment	69 -
3.3.5 Leakage study of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules.....	70 -
3.4 Conclusions	72 -
References	73 -
Chapter 4 Comparative physicochemical analysis of suspended and NaCS-PDMDAAC immobilized cultivation of <i>Chlorella</i> sp.....	79 -
4.1 Intruduction.....	79 -
4.2 Materials and methods	79 -
4.2.1 Microalgal strain	79 -
4.2.2 Preparation and characterization of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules	79 -
4.2.3 Batch cultivation of NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. capsules	79 -
4.2.4 NaCS-PDMDAAC- <i>Chlorella</i> sp. culture pre-treatment	79 -
4.2.5 Lipid extraction and methylation	80 -
4.2.6 Chlorophyll extraction	82 -
4.2.7 Experion TM automated chip electrophoresis and 2D gel electrophoresis.....	83 -
4.2.8 Analytical methods	89 -
4.3 Results and discussion.....	89 -
4.3.1 Effect of different microalgae cell pre-treatment methods	89 -
4.3.2 Biophysical characteristics of microalgae cells	93 -
4.3.3 Lipid analysis	94 -

4.3.4 Chlorophyll analysis	- 95 -
4.3.5 Protein analysis	- 96 -
4. 4 Conclusions	- 98 -
References	- 99 -
Chapter 5 Pool boiling characteristics of microalgae suspension	- 103 -
Nomenclature.....	- 103 -
5.1 Introduction	- 104 -
5.2 Materials and methods	- 104 -
5.2.1 Microalgal strain	- 104 -
5.2.2 Medium	- 105 -
5.2.3 Cultivation of microalgae.....	- 106 -
5.2.4 Pre-treatment of microalgae culture.....	- 107 -
5.2.5 Experimental apparatus.....	- 107 -
5.2.6 Analytical methods	- 109 -
5.2.7 Tolerance analysis of the experiment.....	- 110 -
5.3 Results and discussion.....	- 111 -
5.3.1 Conductivity, density and heat capacity of microalgae suspension.....	- 111 -
5.3.2 Rheological study.....	- 114 -
5.3.3 Boiling and boiling point of microalgae suspension.....	- 114 -
5.3.4 Heat and mass transfer of pool boiling of microalgae suspension.....	- 117 -
5.3.5 Cornwell function of $Nu-Re_b$	- 122 -
5.3.6 Effect of vacuum pool boiling on microalgae cells	- 125 -
5.4 Conclusions	- 129 -
References	- 130 -
Chapter 6 falling film evaporation characteristics of microalgae suspension.....	- 135 -
Nomenclature.....	- 135 -
6.1 Introduction	- 135 -
6. 2 Materials and methods	- 136 -
6.2.1 Pre-treatment of microalgae culture.....	- 136 -
6.2.2 Experimental apparatus.....	- 136 -

6.2.3 Trial run of the apparatus system.....	- 144 -
6.2.4 Protocol system operation.....	- 145 -
6.2.5 Tolerance analysis of the experiment.....	- 146 -
6.2.6 Calculation of heat transfer coefficient.....	- 146 -
6.2.7 Surface tension test of microalgae suspension.....	- 147 -
6.3 Boiling heat transfer of microlagae suspension.....	- 148 -
6.3.1 Patterns of falling film evaporation.....	- 148 -
6.3.2 Surface tension and bubble formation.....	- 149 -
6.3.3 Nucleate boiling.....	- 150 -
6.4 Results and discussion.....	- 151 -
6.4.1 Heat transfer.....	- 151 -
6.4.2 Bubble formation	- 156 -
6.4.3 Bubble formation machanism	- 158 -
6.5 Conclusions	- 160 -
References	- 161 -
Chapter 7 Conclusions and prospects	- 167 -
7.1 Conclusions	- 167 -
7.2 Inovation of this thesis	- 168 -
7.3 Prospects and suggestions.....	- 168 -
Author's publications	- 171 -
Appendix	- 173 -

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库